

早稲田大学大学院 理工学研究科

# 博士論文審査報告書

## 論 文 題 目

超高密度波長多重伝送方式を用いた  
高性能光ネットワーク

Advanced Optical Networks Employing Super-Dense  
Wavelength Division Multiplexing Transmission Method

申 請 者

鈴 木	裕 生
Hiroo	Suzuki

--

2 0 0 8 年    2 月

波長の異なる多くの光信号を重ね合わせて伝送容量を増大させる波長分割多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)技術は、大容量光ファイバー通信を実現する上で不可欠な技術となっている。限られた波長帯域を有効利用しながら大容量光ファイバー伝送を実現するためには、伝送チャンネルの高密度化によって波長数を増大させるアプローチは有望な手法である。これまでに、波長(周波数)間隔が 25 GHz 以下の超高密度 WDM 伝送については、コアネットワークにおける実験がいくつか報告されているものの、システムの設計指針については体系的に明らかにされていない。また、メトロネットワークおよびアクセスネットワークにおいては、このような超高密度 WDM 技術に適した光ネットワーク構成について十分に議論されてはいない。本論文は、極めて狭い波長間隔で波長多重化する超高密度 WDM 伝送システムの設計と大容量光ネットワークの実現に関する研究をまとめたものである。

申請者は、コアネットワーク、メトロネットワークおよびアクセスネットワークのすべてを研究対象とし、超高密度 WDM 伝送方式およびそれを用いた光ネットワーク構成法を提案し、設計指針を示した。

本論文は 6 章から構成されている。各章の概要と主要な章の評価を以下に述べる。

第 1 章は序論で、ファイバー通信用光多重化技術における本研究の位置づけと意義を明らかにするとともに、本論文の構成について説明している。

第 2 章では、波長分散が支配的劣化要因となるシングルモードファイバーを用いたコアネットワークを対象とし、光ファイバーでの高速伝送において問題となる分散劣化に対する解決策として、伝送速度を変えずに大容量化を実現可能にする超高密度 WDM 伝送方式を提案した。

この方式では、適切なファイバー入力パワーの設定のもとで、分散補償なしで数百 km 規模の超高密度 WDM 伝送(波長間隔 25 GHz 以下)が可能となることを明らかにした。また、主要な要素技術として、超高密度 WDM 伝送用の小型かつ高波長安定性を有する多波長光源のプロトタイプを開発した。

さらに、1550 nm 帯(C-band)と 1580 nm 帯(L-band)を利用し、このプロトタイプ光源を用いた伝送速度 2.5 Gbit/s、波長間隔 12.5 GHz、波長数 512、中継距離 80 km × 4 スパンの伝送実験を行い、プロトタイプ光源の有用性を確認した。さらに、波長間隔 12.5 GHz の多中継超高密度 WDM 伝送において、分散補償を不要化できることを実証した。

このように、超高密度 WDM 伝送方式を早期に大規模で実証することにより、分散補償の有無と伝送距離限界の関係を定量的に明らかにし、超高密度 WDM 伝送方式の有効性を示したことは高く評価される。

第 3 章では、多波長後方励起分布ラマン増幅を用いた超高密度 WDM 伝送方式を提案した。分散シフトファイバー(DSF: Dispersion-Shifted Single Mode Fiber)の零分散領域(DSF の C-band)においては、光ファイバーの非線形光学効果のひとつである四光波混合(FWM: Four Wave Mixing)によ

って伝送性能が著しく劣化することが、従来からの問題であった。

本章では、零分散領域における FWM の抑圧手法として、多波長後方励起分布ラマン増幅を用いた超高密度 WDM 伝送方式を提案している。

分布ラマン増幅に関して、通常用いられるエルビウム添加光ファイバー増幅器 (EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier) との違い、および前方励起、後方励起による分布ラマン増幅特性の違いを数値計算により示し、FWM の抑圧には、後方励起分布ラマン増幅が有利であることを明らかにした。また、EDFA の励起用レーザーとして広く用いられている出力 100~150 mW 程度の半導体レーザーを利用して励起光源を多波長化することにより、分布ラマン増幅器の高利得化、広帯域化および利得平坦化が可能となることを示した。

さらに、150 mW 級半導体励起レーザーを 4 波長多重した励起光源を用いて、チャンネル間隔 25 GHz、総伝送容量 1 Tbit/s ( $10 \text{ Gbit/s} \times 100$  チャンネル)、伝送距離 320 km (中継間隔 80 km  $\times$  4 スパン) の超高密度 WDM 伝送実験を行った。後方励起による分布ラマン増幅 (ラマン利得 15 dB) と誤り訂正符号を併用してファイバー入力パワーを -16 dBm/ch まで低減することにより、零分散領域において帯域利用効率 0.4 bit/s/Hz の超高密度化が可能となることを実証した。

このように、多波長後方励起分布ラマン増幅によって、零分散領域における四光波混合の影響を低減し、帯域利用効率のよい超高密度伝送を実現したことは高く評価される。

第 4 章では、メトロリングネットワークにおける超高密度波長多重に関する提案と実証を行った。

リングネットワークの超高密度化を実現するには、ノード通過時の光フィルタリングによる波形劣化が一つの大きな問題である。とくに通過ノード数の増大に伴って劣化の影響が大きくなることが問題であった。本章では、通過ノード数に関係なく、光フィルタリングによる波形劣化を低減できる技術として、WDM 信号を光カプラにより分岐・挿入するタップ型光分岐挿入装置 (OADM: Optical Add/drop Multiplexer) と多波長光源からなる超高密度 WDM リングネットワークを提案し、その有用性を実証した。

増設性に優れたタップ型 OADM 構成、および高信頼性を実現する冗長化方式・利得制御方式を考案し、設計指針を確立した。また、タップ型 OADM と多波長光源からなるリングネットワークのシミュレーションモデルを考察し、伝送特性を定量的に明らかにした。さらに、シミュレーション結果に基づき、リングネットワークのプロトタイプを設計・開発した。

波長間隔 12.5 GHz の 256 波長を用い、センターノードと 4 つのリモートノードからなる総リング長 200 km (中継区間 40km) のリングネットワークを構築して伝送実験を行った結果、安定なエラーフリー動作を確認した。

以上のように、新しい超高密度 WDM リングネットワーク提案し、その有用性を実証したことは高く評価される。

第5章では、アクセスネットワークにおける超高密度波長多重に関する提案と実証を行った。

アクセスネットワークにおいては、既存の受動光ネットワーク（PON: Passive Optical Network）に影響を与えることなく、大容量化を実現することが課題となる。また、サービス即応性と保守運用性に優れたシステムが望まれている。ここでは、既存のPONと同一のパワースプリッター網上に重畳が可能であるという条件のもとで、各ユーザーに占有的に波長を割り当てるWDM技術を活用するPONを設計し、その実現可能性を示した。

大容量で使いやすいネットワークを実現し、サービス即応性と保守運用性の向上を図るうえで、加入者宅に配置する光終端装置（ONU: Optical Network Unit）の単一品種化（カラーレス）技術としては波長可変方式が有望であることを明らかにした。また、プラグアンドプレイ機能に関して、複数のONUの同時接続時にも対応可能で、ハードウェアを付加することなしにONUの送受信波長を遠隔自動で設定できるアルゴリズムを考案した。

以上のように、経済的で使いやすいアクセスネットワークの実現に向け、カラーレス技術開発の方向性を示すとともに、プラグアンドプレイ機能のためのアルゴリズムを考案し、その有用性を実証したことは高く評価される。

第6章は結論で、本研究で明らかにした内容を整理してまとめている。また、超高密度WDM伝送方式についての今後の展望と課題についても言及している。

以上のように本論文は、コアネットワークからアクセスネットワークに至る日本の光ネットワーク構成全体を対象に、超高密度WDM伝送方式による光ネットワークの高性能化に関して申請者の行った研究をまとめたものである。なかでも、波長帯域を効率的に利用するという観点から、超高密度WDM伝送方式に関するさまざまな要素技術と光ネットワーク構成の提案および実証を先駆的に行い、その設計指針を確立したことは高く評価され、これらの成果は光通信工学の発展に寄与するところが多い。よって本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2008年 1月

審査員

(主査)	早稲田大学 教授	理学博士 (早稲田大学)	小松 進一
	早稲田大学 教授	博士 (工学) 早稲田大学	中島 啓幾
	早稲田大学 教授	工学博士 (早稲田大学)	橋本 周司
	早稲田大学 教授	工学博士 (東京工業大学)	宇高 勝之